NOTICE D'UTILISATION DU LOGICIEL SPIRPACF

(Révision du 17/03/2005)

Avertissement

Ce logiciel ne fonctionne que sous Windows XP, et à condition d'avoir installé dans Program Files Microsoft .NET Framework Version 1.1 Redistributable . ***Si vous n'avez pas ce dernier sur votre disque, deux possibilités :***

- *le télécharger directement par internet (23 Mo : assez lourd) ; il n'existe pas toujours en version française, de sorte que lors de l'utilisation du logiciel SPIRPACF les virgules décimales sont parfois transformées en points : se conformer à la version disponible, sinon l'utilisation de points à la place de virgules décimales ou inversement provoquera une erreur.*

- *si vous disposez de la présente notice sur CD-Rom, installer* dotnetredistr.exe, *qui est en version française.*

Le logiciel peut être envoyé par e-mail, sur demande.

Sommaire

A. Mode d'emploi

B. Description du fonctionnement

C. Comment créer de nouveaux cas

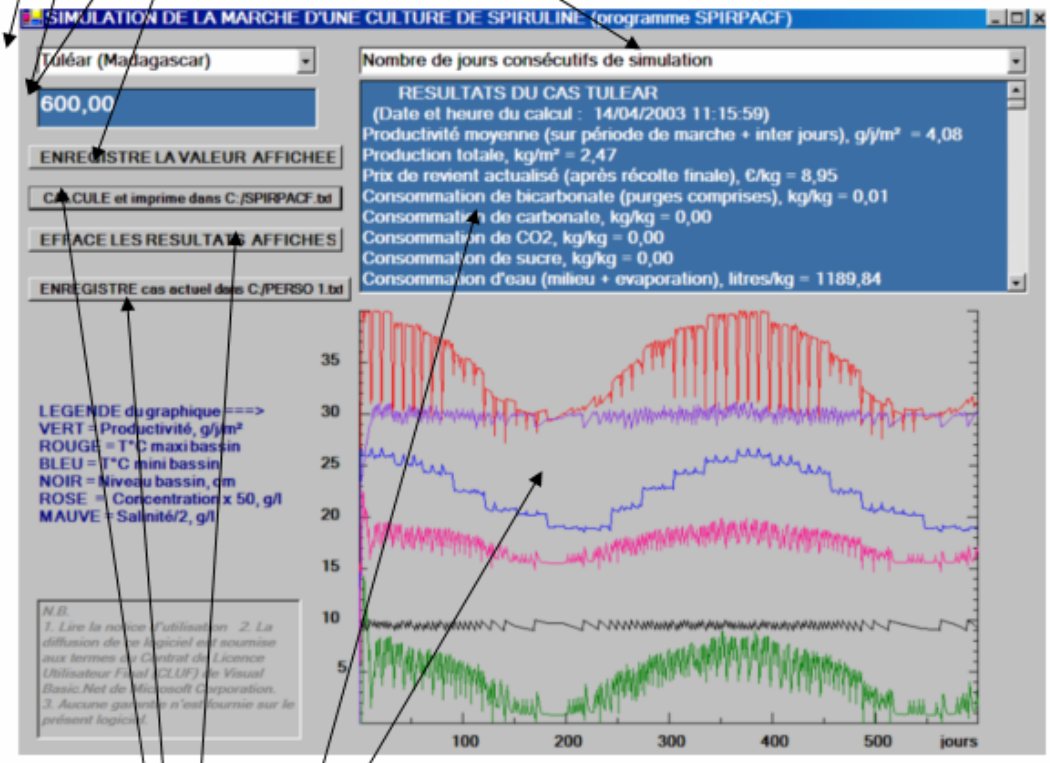
ANNEXE 1 : Description détaillée du modèle de simulation

ANNEXE 2 : Les facteurs influençant la photosynthèse

A) Mode d'emploi du logiciel SPIRPACF

La résolution d'écran recommandée est de **1024 x768** pixels. Un écran 15 pouces au moins est préférable.

1. **Choisir un cas** dans la liste présentée
2. Choisir **un paramètre**
3. **Lire** sa valeur
4. **Modifier** éventuellement sa valeur
5. **Enregistrer** cette dernière


SIMULATION DE LA MARCHE D'UNE CULTURE DE SPIRULINE (orogramme SPIRPACF)
Tuléar (Madagascar)
600,00
ENREGISTRE LA VALEUR AFFICHEE
CALCULE et imprime dans C:/SPIRPACF.txt
EFFACE LES RESULTATS AFFICHES
ENREGISTRE cas actuel dans C:/PERSO 1.txt
Nombre de jours consécutifs de simulation
RESULTATS DU CAS TULEAR
(Date et heure du calcul : 14/04/2003 11:15:59)
Productivité moyenne (sur période de marche + inter jours), g/j/m² = 4,08
Production totale, kg/m² = 2,47
Prix de revient actualisé (après récolte finale), €/kg = 8,95
Consommation de bicarbonate (purges comprises), kg/kg = 0,01
Consommation de carbonate, kg/kg = 0,00
Consommation de CO2, kg/kg = 0,00
Consommation de sucre, kg/kg = 0,00
Consommation d'eau (milieu + evaporation), litres/kg = 1189,84
LEGENDE du graphique ===>
VERT = Productivité, g/j/m²
ROUGE = T°C maxi bassin
BLEU = T°C mini bassin
NOIR = Niveau bassin, cm
ROSE = Concentration x 50, g/l
MAUVE = Salinité/2, g/l
35
30
25
20
15
10
5
100
200
300
400
500
jours

6. Effectuer le **calcul** quand on a modifié tous les paramètres voulus
7. Lire les **résultats** (qui sont copiés en même temps dans C:\SPIRPACF.txt)
8. **Sauvegarder** le cas si on veut le garder, sous le nom de C:\PERSO 1.txt
9. **Effacer** les résultats avant nouveau calcul avec de nouveaux paramètres ou sur un nouveau cas.

B) Description du fonctionnement du logiciel

Les résultats se lisent soit sur les graphiques (attention aux échelles), soit sur le tableau journalier. Les concentrations en spiruline sont mesurées juste avant la récolte, et les pH sont mesurés à 19 heures.

C) Comment créer de nouveaux cas

Plutôt que de changer les valeurs de paramètres par la méthode ci-dessus (§ A), il est possible d'écrire un fichier texte qui est une série de 179 valeurs de paramètres ou caractères délimiteurs, séparés par des virgules. Pour faciliter le repérage des paramètres, un délimiteur (une lettre majuscule entre guillemets) est placé après chaque série de 12 valeurs. En voici un exemple :

32.7,33.8,33.3,32.7,31.6,31.1,30,30,30.5,30.5,31.6,31.6,"/A/",19.4,20,21.1,21.6,21.1,20.5,20.5,21.1,20,20,20,19.4,"/B/",19.4,20,21.1,21.6,21.1,20.5,20.5,21.1,20,20,20,19.4,"/C/",5.8,14.3,25.8,26.7,29.2,30,35.5,38.7,36.7,38.7,23.2,8.4,"/D/",2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,"/E/",0.26,0.26,0.26,0.26,0.26,0.26,0.26,0.26,0.26,0.26,0.26,0.26,"/F/",20,45,135,140,180,142,190,250,200,200,105,35,"/G/",0,0,0,366,1,0,0,0.2,0.1,20,0,20,"/H/",1,0,1,1,0,340,5,0.3,0.15,1.8,10,0,"/I/",15,7,0,0,1,30,0,0,6.13,1,0,365,"/J/",5,5,0,0,9.6,10,0,0,0,0,0,100,"/K/",10,0,0,1,1,0.5,1,1,0.1,1,0.2,1,"/L/",0.6,0.4,0.2,10,30,0,0.67,0,95,0,50,1,"/M/",1,0,42,0,46,10,30,"BANGUI",1,0

N.B. Les décimales doivent être marquées par des points, quelle que soit la version.

Voici la clé de compréhension des valeurs ci-dessus (la même clé vaut pour les données imprimées dans les résultats) :

a) Données Météorologiques

- série **avant** A : moyennes des températures maxi (°C) journalières pour les 12 mois
- **entre A et B** : id pour températures mini, °C
- **B - C** : températures de rosée, °C
- **C - D** : % de temps nuageux = (1 – fraction solaire) x 100

N.B. Pour calculer la fraction solaire à partir des « heures de soleil par jour » il faut disposer de la durée du jour théorique, laquelle est facile à calculer avec le petit logiciel durjour.exe

- **D - E** : vitesses du vents , m/s
- **E - F** : coefficients de trouble de l'atmosphère (normal = 0.26, pollué= 0.5)
- **F - G** : quantités de pluie, litres/m²

b) Après les données météo du site, viennent les **79** paramètres d'exploitation des bassins, classés par ordre alphabétique (le même ordre que dans la liste déroulante permettant de visualiser les paramètres sur l'écran), et également par séries de 12 :

- **G - H**

Ajout maxi bicarbonate, g/jour/m²
Ajout maxi CO2,g/jour/m²
Ajout maxi sucre, g/jour/m²
Altitude, m
Appoint d'eau : 1= possible, 0 = impossible
Azimuth du plan de la culture (degrés d'angle ; 0 = Sud; 90 = Est)
Basicité de l'eau d'appoint, gmoles/l
Basicité maxi autorisée dans le milieu, gmoles/l
Basicité du milieu neuf (> ou = basicité de l'eau), gmoles/l
Capacité de récolte maxi, g/jour/m²
Carburant (aucun = 0; CH4 = 1; C3H6 = 2;C4H8 = 3; MeOH = 4; EtOH= 5; CH4 dans biogaz = 6)
Coefficient d'absorption du CO2, gmoles/hr/m²/atm (normal = 20)

- **H - I**

Coefficient d'ajustement de la fonction photosynthèse (normal = 1)
Coefficient de modulation de la régulation de l'ombrage (entre 0 et 1)
Coefficient de modulation de la régulation d'aération (entre 0 et 10)
Coefficient de modulation de la vitesse du vent (entre 0 et 10)
Coeffi. de transfert thermique de l'isolant (0 à10 W/m²/°C)(ex: 2 cm de PS expansé = 1)
Concentration en CO2 dans l'air externe, vpm (normal = 340)

Concentration minimum en sels "fixes" (chlorures, sulfates, nitrates), g/l; >= 1
Concentration en spiruline après récolte, g/l (> 0,15)
Conc. en spiruline juste après ensemencement et après récolte finale, g/l (> ou = 0,15)
Consommation de CO2, kg/kg de spiruline (normale = 1,8)
Débit d'aération de la serre , Nm3/hr/m²; quelconque si pas de serre
Débit de carburant vers brûleurs et/ou groupe électrogène, g/hr/m² (quelconque si pas de carburant)

- **I – J**

Frais fixes actualisés (amortissements, M.O., entretien...), €/m²/période de marche
Heure moyenne de la récolte
Inclinaison du plan de la culture, en degrés d'angle par rapport à l'horizontale
Isolation (pas isolé = 0; totale la nuit = 1; thermique de nuit = 2: thermique nuit et jour = 3)
Jour initial (quantième dans le mois)
Lumière maxi autorisée (en Klux) quand le bassin est à 10°C (par ex. 30)
Lampes : seuil d'allumage, Klux dans serre mesurés sous ombrage éventuel
Lampes, puissance en Klux ; si non nul, isolation totale impossible
Latitude du lieu, degrés d'angle (entre - 65 et 65 ° ; < 0 dans l'hémisphère Sud)
Mois initial (quantième dans l'année)
Nombre de jours d'arrêt de récolte consécutifs en fin de semaine (0,1,2 ou 3)
Nombre de jours consécutifs de simulation (600 maxi)

- **J - K**

Nombre de jours d'arrêt inter-campagnes (nettoyage, entretien, redémarrage)
Nombre de jours sans ajout de bicarbonate, sucre ou CO2 en fin de campagne
pH du milieu de culture épuré recyclé (quelconque si pas de recyclage)(si < 8, pH en équilibre avec air extérieur)
pH de l'eau d'appoint (quelconque si sa basicité est nulle)
pH minimum autorisant la récolte
pH qu'on cherche à obtenir par ajout de carbone (consigne de régulation)
Pourcent de CO2 (en volume) dans le biogaz ; quelconque si pas de biogaz
Pourcent d'ombrage fixe (actif nuit et jour)
Pourcent d'ombrage nocturne (écran thermique)
Pourcent de la chaleur de combustion transformé en électricité
Variable supprimée : mettre une valeur quelconque
Pourcent de la pluie tombant sur la surface du bassin admis dans le bassin (cas sans serre)

- **K – L**

Pourcent de purge quotidienne maximum autorisé
Variable supprimée : mettre une valeur quelconque
Pourcent de la puissance des lampes contribuant au chauffage de la serre (> 32)
Prix bicarbonate de sodium, €/kg
Prix carbonate de sodium, €/kg
Prix carburant, €/kg (quelconque si pas de carburant) (si biogaz = prix du CH4 contenu)
Prix CO2, €/kg
Prix de l'eau, €/m3
Prix de l'électricité 220 V achetée ou vendue, €/ kWh
Prix du phosphate monoammonique, €/kg
Prix du sel de cuisine, €/kg
Prix du sucre, €/kg

- **L - M**

Prix du sulfate dipotassique, €/kg
Prix du sulfate de magnésium heptahydraté (sel d'Epsom), €/kg
Prix de l'urée, €/kg
Profondeur initiale de la culture, cm

Profondeur maximum de la culture, cm (> profondeur initiale)
Purge, ajouts carbone, eau, recyclage supprimés les jours d'arrêt de week end = 1; sinon 0
Rapport molaire CO2/base du milieu de culture initial (1 si Na2HCO3 ; 0,67 si natron)
Recyclage de milieu de culture purifié, litres/m²/jour
Rendement de récolte, % (= 100 – % de pertes à la récolte, au séchage et emballage)
Salinité totale de l'eau d'appoint (tds), g/litre
Salinité maximum autorisée dans le milieu de culture, g/litre
Serre (1 si le bassin est sous serre, 0 sinon)

- **Après M**

Serre à double paroi gonflée (0 si simple paroi, 1 si double paroi)
Taux d'actualisation des coûts, %/jour
Température bassin maximum autorisée, °C
Température de réchauffage par pompe à chaleur (PAC), °C (si pas de PAC : 0)
Température de refroidissement par pompe à chaleur, °C (si pas de PAC : > 42) (si = tempér. réchauffage, le bassin est thermostaté à cette tempér.)
Valeur en eau équivalente des fonds et du bord du bassin, cm
Vitesse moyenne d'agitation, cm/s (30 = vitesse maxi normale ; > 30 ---> productivités exceptionnelles)
XYZ = Référence du cas (à mettre entre guillemets)
(Z) Coefficient d'ajustement de la fonction respiration (normal = 1)
(ZZ) Option sur l'utilisation du carburant : si seulement pour régulation du pH = 0, si aussi pour électricité et/ou chauffage =1

Une fois écrit ce fichier, l'enregistrer sous un nom de votre choix. Au moment de l'utiliser, enregistrez-le sous C:\PERSO 1.txt (ou l'un quelconque des cinq PERSO) pour l'utiliser.

Dans la pratique, on part généralement d'un exemple existant, on le modifie à l'écran, et on l'enregistre.

ANNEXE 1

LE MODELE DE SIMULATION DE CULTURE DE SPIRULINE

Utilisation

Un intérêt du logiciel est de pouvoir optimiser rapidement la marche d'une culture de spiruline fonctionnant sur un site donné, dans des conditions climatiques données.

Il peut servir aussi comme aide à la conception d'un projet correspondant à un objectif donné, ou comme didacticiel ("simulateur de culture").

Résultats

Ils se lisent soit sur les graphiques (attention aux échelles), soit sur le tableau journalier.
Les concentrations en spiruline sont mesurées juste avant la récolte, et les pH sont mesurés à 19 heures.

Application

Le modèle s'applique au cas d'un bassin à l'air libre ou fermé par une couverture translucide, avec ventilation contrôlée. Un mode de réalisation particulier de ce dernier cas est de tendre un film de serre par dessus les bords du bassin [Jourdan J.P. (1993) "Solarium spirulina farm in the Atacama desert (North Chile)", Bulletin de l'Institut océanographique, Monaco, N° spécial 12, page 191]; un autre est constitué par le "bassin respirant" à aération naturelle par cheminée [Fox R.D. (1996) "Spirulina, production & potential", Edisud, Aix-en-Provence]; une gaine en film de serre, placée horizontalement et remplie partiellement de milieu de culture constitue aussi un mode de réalisation possible ("photobioréacteur"). Pour que la simulation s'applique il faut et il suffit que la surface de la culture en contact avec l'atmosphère soit égale à la surface éclairée. Le mode d'introduction de l'air est quelconque. Il n'y a pas de limitation à l'inclinaison et à l'orientation de la surface active de la culture (le milieu de culture peut ainsi être en écoulement sur un plan incliné comme dans les photobioréacteurs de type Setlik). La latitude du site d'installation doit être comprise entre les cercles polaires. Pour les climats froids, un chauffage et/ou un double vitrage et/ou un écran thermique nocturne facultatifs ont été prévus ; le chauffage est par combustion de carburant propre et dans ce cas il est prévu en option la co-génération d'électricité et le CO2 de combustion peut servir à alimenter la culture ; même si le chauffage par combustion s'avère trop onéreux dans la majorité des cas, on peut souvent utiliser valablement la combustion pour apporter du CO2. Une autre option facultative est l'isolation de la culture, avec plusieurs modes, réservés aux serres : soit isolation complète (adiabatique) sans aération ni chauffage la nuit, soit permettant l'aération et le chauffage la nuit seulement ou jour et nuit. On a ajouté une option (un peu théorique car bien inadaptée aux productions artisanales !) permettant un éclairage électrique sur les bassins. Une autre option permet de recycler du milieu de culture après épuration (et changement du pH). Enfin il est possible de réchauffer ou refroidir artificiellement le bassin par une pompe à chaleur. Ces options sont détaillées ci-dessous.

Principes du calcul

Le programme simule le fonctionnement du bassin depuis son ensemencement jusqu'à son arrêt au bout d'un nombre de jours fixé (pouvant atteindre 18 mois). A partir d'un milieu de culture à pH donné ensemencé au temps zéro, on calcule la croissance des spirulines heure par heure ; un bilan thermique et un bilan carbone (absorption de CO2 de l'air + injection - consommation) permettent de calculer, également heure par heure, la température et le pH, qui eux-mêmes déterminent la vitesse de croissance.

La récolte a lieu chaque jour (à une heure au choix), sauf les jours d'arrêt hebdomadaire, et elle ramène la concentration en spiruline à une valeur au choix, sauf que la capacité de récolte journalière ne peut dépasser une limite à fixer. Mais il n'y a pas de récolte si le pH est inférieur à un seuil, ni pendant les week-ends (0 à 3 jours d'arrêt consécutifs par semaine). En fin de campagne on fait une récolte totale (jusqu'à la concentration d'ensemencement), et un certain nombre de jours sont consacrés aux opérations d'inter-campagnes. La productivité moyenne et le prix de revient prennent en compte ces jours d'inter-campagnes.

La température sèche de l'air ambiant et le rayonnement absorbé par la culture sont calculés heure par heure à partir des données météo chargées (valeurs moyennes mensuelles). La température de rosée de l'air, le facteur de trouble et la vitesse du vent sont supposés constants en cours de journée. Le pourcentage de nébulosité est "concentré" sur des jours "gris" répartis uniformément sur trois périodes de dix jours à l'intérieur de chaque mois, sans correction pour la température de l'air ambiant ces jours-là. Un % (au choix) de la pluie pénètre dans le bassin à l'air libre.

Une purge (de filtrat) est pratiquée pour maintenir le niveau en cas de pluie excessive, ou pour maintenir la basicité et, si possible, la salinité en dessous du maximum fixé. Les sels et éventuellement l'eau voulus sont ajoutés pour maintenir la qualité du milieu de culture.

De l'eau est aussi ajoutée pour compenser l'évaporation et maintenir le niveau entre le niveau normal (initial) et un minimum (1 cm en dessous du niveau normal). Mais une option permet de supprimer cet appoint, ce qui permet de simuler le cas des lacs naturels ne recevant pas d'autre eau que la pluie, ou bien de simuler le cas de pénurie d'eau.

Indépendamment de la purge il est prévu de pouvoir envoyer du filtrat vers un système d'épuration éliminant les matières organiques et modifiant le pH. Un même volume est recyclé simultanément au bassin ; il est admis que ce recyclage ne change ni la basicité ni la salinité "fixe" (sels non carbonatés) du milieu, ni le niveau de liquide dans le bassin, ni la température. Le pH du recyclat est fixé librement, mais en général proche de 10. Si l'on fixe un pH < 8, la valeur utilisée sera automatiquement celle correspondant à l'équilibre avec l'air extérieur.

Une option permet de décider si les purges, l'appoint d'eau, l'alimentation carbonée (CO_2 pur, sucre, bicarbonate) et le recyclage sont possibles ou non les jours d'arrêt hebdomadaire; s'ils sont possibles ces jours-là, le volume de milieu à purger ou à épurer est filtré, et la biomasse récupérée est remise dans le bassin.

La nuit, la culture peut être complètement isolée (à la fois thermiquement et de l'atmosphère, avec chauffage coupé) ou partiellement (seuls les échanges convectifs et radiatifs pouvant être supprimés ou réduits, avec aération et chauffage maintenus). La culture peut être ombrée et/ou chauffée et/ou isolée thermiquement. En cas d'isolation nocturne complète, les options éclairage artificiel et la combustion sont impossibles, et une aération minime est maintenue pour permettre la respiration (réduite à 20 % de la normale) de la culture mais elle est négligée du point de vue effet thermique et évaporation. Le degré d'isolation thermique partiel de la serre est réglable. Les options double vitrage, isolation thermique et ombrage sont compatibles..

L'ombrage est supposé arrêter les échanges thermiques radiatifs mais non convectifs. Deux types d'ombrage de jour sont prévus, et se cumulent ; l'ombrage dit "automatique", modulable, est automatiquement installé si les conditions de température et de lumière le demandent; l'ombrage dit "fixe" est permanent nuit et jour. Un écran thermique (ou "ombrage nocturne") peut être installé la nuit pour réduire le refroidissement nocturne ; il se cumule avec l'ombrage fixe éventuel, mais il est sans effet avec l'option isolation.

N.B. : Quand deux ombrages A et B sont "cumulés" cela signifie que la lumière pénétrant la culture est multipliée par (1 – ombrage A/100) x (1 – ombrage B/100).

L'aération de la serre comporte un élément fixe (< 35 Nm3/hr/m²) et un élément "automatique" modulable mis en œuvre selon la température du bassin.

Le chauffage de la serre se fait par combustion d'un choix de combustibles propres (dont biogaz à % de CO2 à fixer au choix), pouvant servir simultanément d'apport de CO2 par injection de tout ou partie des gaz de combustion dans la serre. Mais il est aussi possible de n'utiliser qu'une fraction (pouvant être nulle) de la chaleur de combustion. La combustion se fait nuit et jour. Dans l'option "chauffe = 0" la combustion ne sert qu'à apporter du CO2 ; dans l'option "chauffe = 1", elle sert à la fois à apporter du CO2 et à chauffer le bassin. La chaleur de combustion est automatiquement débranchée du chauffage si la température du bassin dépasse 30°C. La combustion se fait avec de l'air extérieur, avec 10 % d'excès.

Les bassins ouverts ne peuvent pas être chauffés par combustion de carburant, mais ils peuvent l'être par pompe à chaleur.

L'option pompe à chaleur est décrite dans le chapitre suivant (CULTURE DE SPIRULINE AVEC RECHAUFFAGE MATINAL ET REFROIDISSEMENT NOCTURNE PAR POMPE A CHALEUR).

L'option éclairage artificiel majore l'éclairement des bassins sous serre entre 4 et 21 heures (durée maximum 16 heures) quand l'éclairement naturel (mesuré sous ombrage éventuel) est inférieur à un seuil. La consommation électrique des lampes est de 13 mW/lumen (soit 13 Watt/klux/m²), performance des tubes luminescents ou moyenne entre lampes halogène et lampes horticoles HPS – ces dernières pouvant atteindre 6,5 mW/lu lorsqu'elles sont neuves. Dans l'option isolation complète, les lampes sont allumées de 4 heures à 21 heures. La portion de la chaleur dégagée par les lampes admise dans la serre pour contribuer au chauffage est réglable de 32 à 100 %.

Dans le cas des bassins à l'air libre ces options ne sont évidemment pas toutes disponibles : l'ombrage fixe et l'écran thermique nocturne sont possibles..

La vitesse de photosynthèse peut varier selon les souches utilisées ou les circonstances (mortalité, prédateurs) ; elle est donc ajustable au moyen d'un coefficient.

Le programme de calcul ne tient pas compte de la disparition de spirulines par mortalité ou du fait de prédateurs (on admet pour ces deux cas qu'il y a recyclage du carbone à l'intérieur de la culture).

Pour tenir compte de la production des exopolysaccharides non inclus dans la récolte, pouvant varier selon les souches ou les conditions, et pour tenir compte aussi des variations possibles de composition de la spiruline suivant les souches, la consommation de CO2 par kg de spiruline n'est pas considérée comme fixe mais comme une variable ajustable.

On doit aussi fixer le rendement de récolte qui tient compte de la perte de spiruline entre la filtration et le stockage du produit fini.

Le programme néglige :

- l'influence de la vitesse de circulation de l'air interne sur l'évaporation,
- l'effet de l'ombrage du aux bords du bassin par soleil non vertical,
- les variations de teneur en oxygène dans l'atmosphère interne,
- l'acidification ou l'alcalinisation éventuelles du milieu sous l'effet des nutriments (nitrates et urée),
- la dureté éventuelle de l'eau d'appoint.

Salinité, alcalinité et pH de l'eau d'appoint sont pris en compte, ce qui autorise l'utilisation d'eau saumâtre et/ou alcaline. On admet que l'eau apporte le calcium nécessaire.

L'alimentation en carbone, commandée par la régulation de pH, peut se faire soit par ajout direct dans le milieu de culture de bicarbonate ou de sucre ou de gaz CO2 pur, soit par enrichissement en CO2 de l'air de la serre par une fraction des gaz de combustion; un bilan-matières sur le CO2 entre l'entrée de l'air dans la serre et sa sortie permet de calculer la teneur en CO2 de cet air (supposé homogène). Le calcul tient compte du CO2 apporté par l'urée, par l'air frais d'aération et par le recyclage. Rien n'empêche de panacher les diverses sources de carbone.

La photoinhibition de la photosynthèse à basse température est prise en compte par l'interdiction d'opérer à température inférieure à 10°C quand l'éclairement dépasse l'intensité limite choisie, 30 Klux par exemple ; la photosynthèse est supposée s'annuler à température inférieure à 10°C.

Résumé des règles de régulation thermique adoptées en serres :

(La modulation de l'aération et l'ombrage automatique ne s'appliquent pas dans l'option d'isolation themique nuit et jour (valeur 3), ni si les bassins sont thermostatés à la même température nuit et jour)

- Nuit et jour :

  - Aération = débit normal si bassin < 30°C
    débit normal + 50 x coefficient si bassin entre 30 et 35°C
    débit normal + 75 x coeff. si entre 35 et 38°C
    débit normal + 100 x coeff. si > 38°C
  - Ombrage fixe
  - Jamais de chauffage si bassin > 30°C

- Nuit :

  - Ombrage (écran thermique) nocturne

- Jour :

  - Ombrage automatique =
    0 si bassin < 30°C
    50 % x coefficient si bassin entre 30 et 35°C
    75 % x coefficient si > 35°C, ou si < 15°C lorsque la lumière dépasse la valeur de l'éclairement maximum autorisée.

Résumé des règles de régulation thermique adoptées sans serre :

(La modulation de l'ombrage automatique ne s'applique pas si les bassins sont thermostatés à la même température nuit et jour)

- Nuit et jour :

  Ombrage fixe

- Nuit :

Ombrage (écran thermique) nocturne

- Jour :

- Ombrage automatique =
  0 si bassin < 30°C
  50 % x coefficient si bassin entre 30 et 35°C
  75 x coefficient si > 35°C

N.B. Pour un bassin sans aucun dispositif d'ombrage, les coefficients doivent être fixés à une valeur nulle.

Absorption de CO2 atmosphérique

La vitesse d'absorption est proportionnelle au coefficient d'absorption et à la différence des pressions de vapeur de CO2 dans l'air et sur le liquide. La pression de vapeur du CO2 sur une solution de carbonate/bicarbonate de sodium est donnée dans la littérature. Kohl et Riesenfield (1960) donnent dans "Gas Purification" [Kohl A.L. et Riesenfeld F.C. (1960) "Gas Purification", McGraw-Hill Book Co., à la page 117], une formule ayant comme variables la température, la basicité et le rapport c (moles de CO2/mole de base), en mmHg:

$$pCO2 = 68,5 \times b^{1,29} \times (2c - 1)^2 / [(1 - c) \times (333 - 1,8 \times t) \times (0,0487 - 0,0006 \times t)]$$

où
b = basicité du milieu absorbant, gmoles de base forte/litre
c = rapport molaire CO2/base correspondant au pH du milieu
t = température du milieu,°C

L'absorption du CO2, exprimé en g de spiruline/jour/m² (en admettant 1,8 kg de CO2 par kg de spiruline) est alors égale à 0,772 x ka x [0,00076 x vpm x (1 - alt/10000) - pCO2], formule où:

ka = coefficient d'absorption,
gmoles de CO2 absorbés/heure/m²/atmosphère
vpm = teneur de l'air en CO2, ppm volumiques
alt = altitude, mètres
0,772 = (44 x 24)/(1,8 x 760)

Le coefficient d'absorption du CO2 à travers la surface du bassin est réglable, mais généralement il est pris égal à la valeur expérimentale de 20 gmoles/heure/m²/atmosphère.

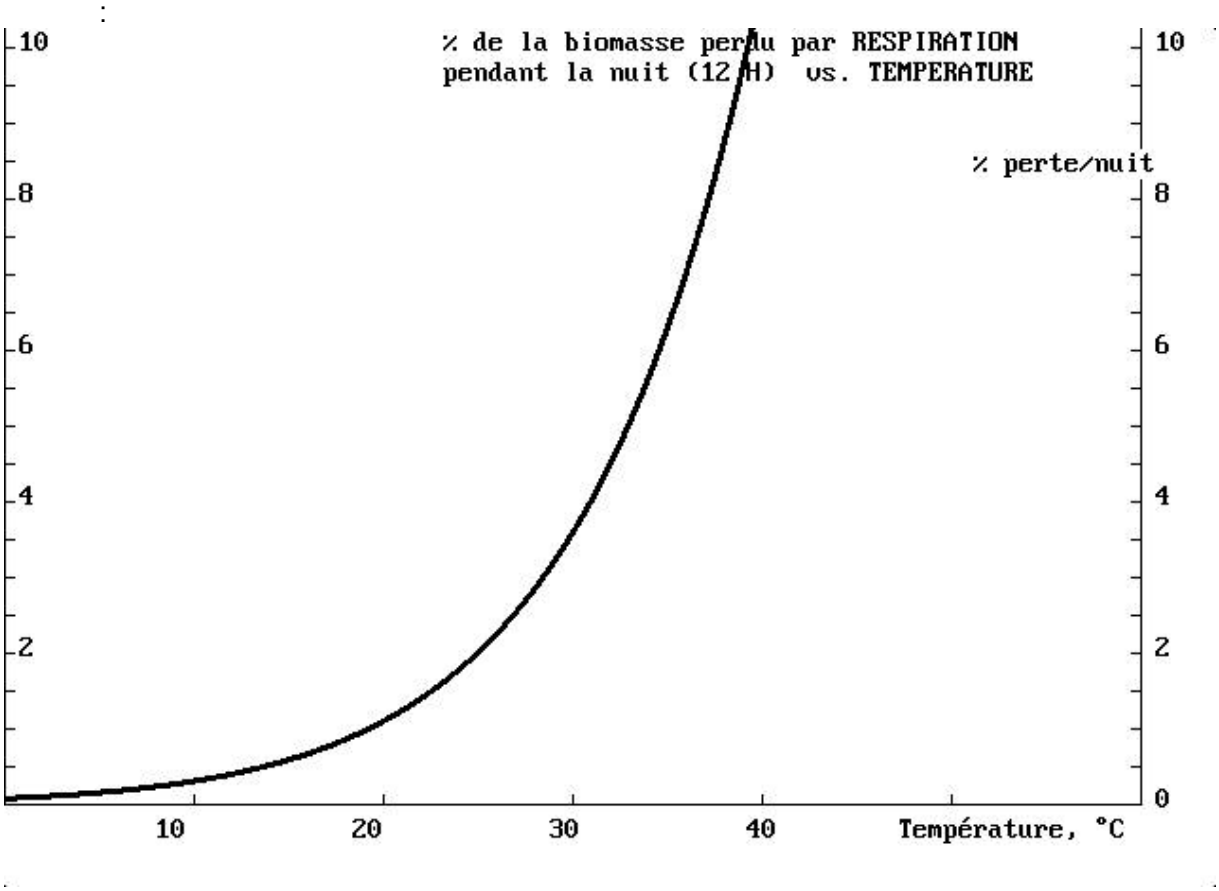
Le modèle combine ces deux formules pour calculer les échanges de CO2 entre l'atmosphère et le bassin.

Respiration

La spiruline ne respire qu'en l'absence de lumière. De jour nous admettons qu'elle ne voit la lumière que dans la couche superficielle de hauteur égale au "Secchi" (nous avons adopté la courbe du Secchi correspondant à la souche dite "spiralée", avec milieu de culture non trouble) et qu'il n'y a pas respiration dans cette couche, mais qu'au-dessous il y a respiration ; ceci suppose que le milieu est agité (homogène). On admet que la respiration est réduite à 20 % de sa valeur normale en cas d'isolation complète nocturne (conformément à plusieurs expériences allant dans ce sens).

Pour quantifier la respiration normale nous utilisons les résultats de J.F.Cornet [Cornet J.F. (1992) "Etude cinétique et énergétique d'un photobioréacteur" Thèse de doctorat, Université de Paris-Sud Centre d'Orsay, 27/02/1992, p. 115] pour la variation avec la température, mais pour la valeur de base à 20°C nous prenons une moyenne entre les indications de Cornet et celles de L. Tomaselli et al. [Tomaselli L., Giovanetti L., Pushparaj B. et Torzillo G. (1987) "Biotecnologie per la produzione di spirulina", IPRA, Monografia 17 (page 21)]. Ceci est bien sûr une approximation car la respiration dépend aussi de la teneur en hydrates de carbone dans la spiruline. Ces hypothèses servent de base pour la simulation et elles sont représentées par le graphique ci-dessous :

:



Respiration en fonction de la température

N.B. Il est possible de modifier cette courbe pour l'ajuster éventuellement à la réalité, grâce au paramètre appelé coefficient d'ajustement de la fonction respiration = variable N° 177 (l'avant-dernière dans la liste).

Croissance par photosynthèse

a) Concentrations en biomasse supérieures à 0,1 g/l (cas général)

Nous admettons que la croissance de la spiruline par photosynthèse est le produit d'un coefficient d'ajustement et de 5 facteurs supposés indépendants et détaillés en Annexe 2 :

- facteur fonction de la salinité
- facteur fonction de la température

- facteur fonction du pH
- facteur fonction de l'éclairement
- facteur fonction du degré d'agitation du milieu de culture

Ce postulat, qui est au cœur du programme, n'est pas très étayé scientifiquement. La comparaison des figures 4 et 19 de la thèse de Zarrouk autorise à admettre que la fonction de la température est indépendante de l'éclairement ; les mesures de productivités sur nos bassins montrent que l'influence du pH, de la température et de la lumière sont en assez bon accord avec les hypothèses contenues dans ce postulat.

Par ailleurs ce postulat implique que la vitesse de photosynthèse ne dépend ni de la hauteur de liquide, ni de la concentration en spiruline, ni de la concentration en nutriments minéraux (autres que le bicarbonate), donc que la photosynthèse est proportionnelle à la surface éclairée. Autrement dit, nous faisons les hypothèses, largement vérifiées dans la pratique aux concentrations considérées, que la croissance est dans la phase linéaire, non limitée par les nutriments minéraux, avec absorption totale de la lumière pénétrant dans le bassin. A noter que la quantité de spiruline par m² (hauteur de liquide x concentration) a cependant une influence sur la productivité par le biais de la respiration (cf § précédent).

Nous admettons aussi que la croissance de la spiruline est uniquement autotrophe. Si une croissance mixotrophe, ou même éventuellement hétérotrophe, se produit, elle sera fortement concurrencée par les organismes hétérotrophes cohabitant avec la spiruline dans le milieu (bactéries, zooplancton). L'erreur commise sur la croissance ne peut de toutes façons être que par défaut. Nous admettons donc qu'en cas d'apport de carbone par le sucre, celui-ci est oxydé en CO2 par un mécanisme quelconque.

b) Pour des concentrations en biomasse inférieures à 0,1 g/l la croissance est exponentielle, ce que le modèle traduit en multipliant la vitesse calculée en a) par dix fois la concentration (en g/l).

Remarque sur la répartition spectrale de l'énergie lumineuse utilisée et le rendement des lampes :

La spiruline étant capable d'utiliser un spectre très large grâce à sa richesse en divers pigments photosynthétiques, les différences de répartition spectrale entre lumières solaires sous différents angles, latitudes et altitude et lumières artificielles sont négligées. Les "klux" (de lumière visible, tels que mesurés au luxmètre) sont supposés avoir l'équivalence suivante avec la puissance totale dissipée :

10 Watt/m²/klux pour le soleil
13 Watt/m²/klux pour les lampes modernes (type iodure ou sodium).

Données de températures et rayonnement solaire

On admet que la température ambiante varie linéairement entre son minimum au lever du soleil et son maximum à 14 heures solaires. On calcule le rayonnement solaire absorbé par la culture comme on le fait pour un capteur solaire avec ou sans vitrage, à partir des équations astronomiques et thermiques classiques rappelées par exemple dans Chouard, Michel et Simon [Chouard Ph., Michel H. et Simon M.F. (1977) "Bilan thermique d'une maison solaire"].

.

Bilan thermique

-

La température de la culture est calculée par bilan thermique entre les apports de chaleur (dont rayonnement solaire et chaleur de combustion) et les diverses pertes thermiques (on néglige les pertes vers le sol et les côtés du réacteur, mais on prend en compte une "valeur en eau équivalente" du fond et des côtés en l'ajoutant à la hauteur de liquide.

On admet que la culture et l'air interne de la serre sont homogènes en température et à la même température, et que l'inertie thermique de l'air est négligeable, mais on tient compte de la capacité thermique du flux d'air traversant la serre qui extrait de la chaleur par chaleur sensible et en se saturant d'eau. Les ajouts (eau, nutriments) sont supposés faits à la température de la culture. On tient évidemment compte des apports de chaleur par le chauffage et les lampes.

On admet que l'ombrage réduit d'un même pourcentage le rayonnement solaire incident et les pertes thermiques par rayonnement, sans affecter les échanges thermiques par convexion.

On tient compte aussi de l'énergie solaire consommée par la photosynthèse en prenant comme valeur calorifique de la spiruline 20,9 kJ/g [Cornet J.F. (1992) "Etude cinétique et énergétique d'un photobioréacteur" Thèse de doctorat, Université de Paris-Sud Centre d'Orsay, 27/02/1992, page 263)|. Les pertes thermiques par convexion vers l'atmosphère et par rayonnement vers le ciel sont calculées comme pour un capteur solaire selon les équations classiques, par exemple celles rappelées par R. Gilles (1976) [Gilles R. (1976), Promoclim A, N° spécial "Les piscines de plein air" (page 269), SEDIT, Paris] et Chouard, Michel et Simon (1977) [Chouard Ph., Michel H. et Simon M.F. (1977) "Bilan thermique d'une maison solaire"]. On néglige l'influence de l'inclinaison éventuelle comme il est justifié d'après P.I. Cooper [Cooper P.I. (1981) "The effect of inclination on the heat loss from flat plate solar collectors", Solar Energy, Vol. 27, N°5, pages 413-420].

Consommation/Production d'électricité

Pour le calcul de la consommation d'électricité pour l'agitation (ou le pompage en cas de culture sur plan incliné), une équation très simple et plus ou moins arbitraire a été adoptée.

En cas d'utilisation de combustible, on peut en option produire de l'électricité par un groupe électrogène ("supercogénération" de chaleur, d'électricité **et** de CO2), permettant d'implanter l'installation même sur site non raccordé au réseau électrique; un excédent d'électricité est généralement disponible pour la vente ou d'autres usages. D'excellentes turbines à gaz miniaturisées sont disponibles. Il faut se méfier des impuretés des gaz d'échappement. Un simple brûleur peut donner des gaz plus purs. Le groupe électrogène pourrait dans un futur que nous espérons proche être une pile à combustible propre.

La puissance électrique pour l'aération a été négligée (aération naturelle probablement suffisante), mais celle consommée par les lampes éventuelles, très importante, est évidemment prise en compte.

L'électricité est supposée achetée et vendue au même prix, avec raccordement à un réseau, les besoins et la production d'électricité n'étant pas forcément en phase (surtout si des lampes ou une pompe à chaleur sont utilisées)..

Calcul du prix de revient

Le modèle comporte un volet économique, permettant de calculer un prix de revient, en tenant compte d'un système de coûts fournis par l'utilisateur et actualisés au temps 0.

Le calcul du prix de revient est basé sur les consommations spécifiques correspondant aux formules suivantes :

- formule de milieu de culture sans nitrate contenant, en plus du sel et du carbonate et/ou du bicarbonate, par litre de milieu : 1 g de K2SO4 + 0,02 g d'urée + 0,08 g de NH4HPO4 + 0,16 g de sulfate de Mg + 0,001 g de Fer
- formule de nourriture comprenant, en g/kg de spiruline : 300 g d'urée + 50 NH4HPO4 + 40 K2SO4 + 30 sulfate de Mg + 0,5 Fer
- - coût du fer (et des oligoéléments) négligé.

La semence est comptée au prix forfaitaire de 10 $ (ou euros le cas échéant) le kilo compté en sec.

Le calcul impute les frais fixes au prorata des jours d'utilisation (nombre de jours de marche + jours "intercampagne"). Si l'installation n'est pas utilisée toute l'année, il faut en tenir compte correctement, par exemple en incluant l'arrêt annuel dans les jours "intercampagne" .

Présentation des résultats

En cours de calcul un graphique apparaît sur l'écran, donnant la récolte quotidienne et différentes autres résultats en fonction des jours. Ce graphique peut être copié et imprimé en passant par la copie d'écran et le presse-papier.

Les résultats complets sont édités en fin de programme, en même temps que les données correspondantes, et peuvent être imprimés.

CULTURE DE SPIRULINE AVEC RECHAUFFAGE MATINAL ET REFROIDISSEMENT NOCTURNE PAR POMPE A CHALEUR

Le logiciel comporte une pompe à chaleur (PAC) fonctionnant à faible différence de température et permettant de réchauffer la culture dès le lever du soleil à une température choisie (par exemple 30°C), et de la refroidir à une température choisie (par exemple 15°C) le soir. Ce système n'est généralement pas rentable mais le logiciel permet de calculer le gain de productivité que l'on peut en attendre de ce type de gestion des températures de bassin.

Par hypothèse la source de chaleur ou de froid de la pompe à chaleur est infinie et la pompe travaille avec un COP (coefficient de performance) de 10.

Si l'on spécifie une température de refroidissement par la PAC supérieure à la température de réchauffage par la PAC, on supprime le refroidissement par PAC (le bassin se refroidit alors seulement par refroidissement nocturne naturel).

Si l'on spécifie la même température de réchauffage et de refroidissement, le bassin est thermostaté à cette température.

Le réchauffage matinal est supposé se faire dès la première heure du jour, alors qu'en réalité il s'étalerait sur au moins deux heures ; mais la différence est très faible sur la productivité à cause de la faible lumière au lever du soleil.

Un usage fréquent de ce logiciel est la simulation des bassins chauffés par une source de chaleur gratuite. Dans ce cas on fixe la température de refroidissement au-dessus de la température de chauffage pour supprimer le refroidissement par PAC ; la consommation électrique de la PAC doit être déduite du prix de revient ; la consommation de chaleur de chauffage est égale à dix fois la consommation électrique de la PAC (cf § suivant).

SIMULATION AVEC CHAUFFAGE GRATUIT

Il est possible de simuler une culture de spiruline bénéficiant d'un chauffage par eau chaude « gratuite » (géothermique ou résiduelle d'une centrale électrique par exemple).

Pour cela, fixer la température de chauffage du bassin pendant le jour et donner à la température de nuit une valeur supérieure (ce qui revient à couper le chauffage au coucher du soleil).

Pour connaître la chaleur de chauffage moyenne utilisée (en kWh/kg), multiplier par 10 la consommation électrique de la pompe à chaleur. La consommation de chaleur journalière est accessible en demandant l'option résultats journaliers et en multipliant par 10 la consommation électrique de la pompe à chaleur, en kWh/m², pour le jour en question.

Le prix de revient obtenu comporte le coût de l'électricité de la pompe à chaleur, qui est indiquée à part : le déduire. Ajouter éventuellement le coût de la chaleur « gratuite ».

ANNEXE 2

Influence de la température, de la lumière, de l'alcalinité, de la salinité et du pH sur la photosynthèse de la spiruline

On peut admettre que la vitesse maximum de photosynthèse, dans un bassin bien agité, et dans les meilleures conditions de température, lumière, alcalinité, salinité et pH, est voisine de 1,8 g/heure/m² de bassin.

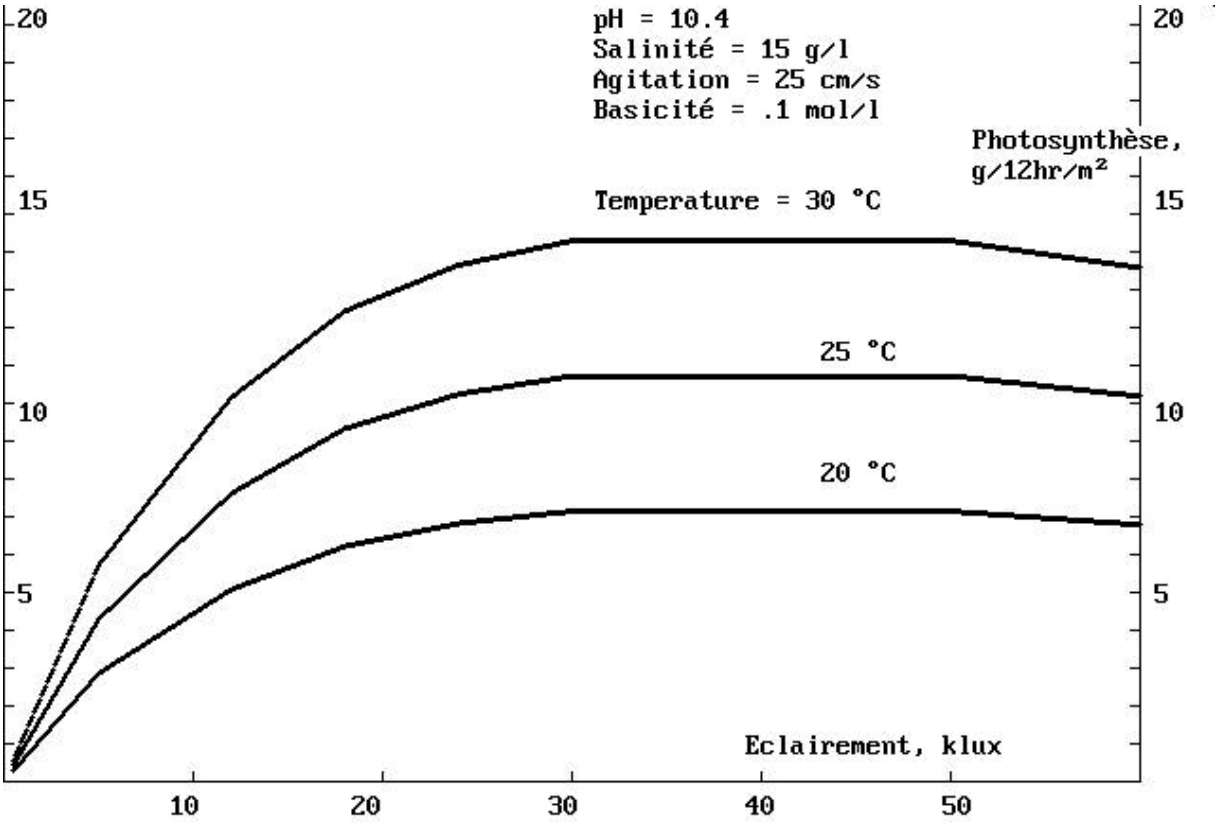
Cette vitesse peut d'ailleurs varier en fonction de la souche de spiruline et de la présence de catalyseurs.

Dans le programmes de simulation on fait l'hypothèse que la fonction photosynthèse est directement proportionnelle à des fonctions de la température, de l'éclairement, de la salinité, du pH et du degré d'agitation :

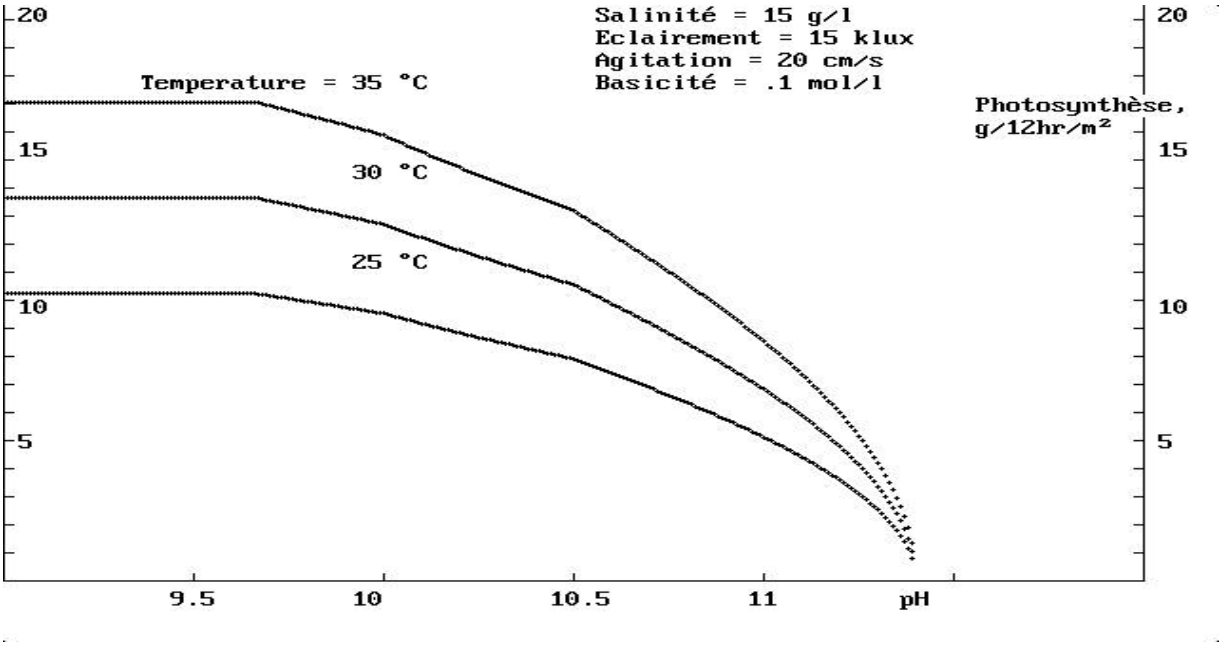
Vitesse de photosynthèse = k x f(T) x f(klux) x f(salinité) x f(pH) x f(agitation)

Cette hypothèse n'a pas de vraie base scientifique, mais elle facilite les calculs et elle ne donne pas de si mauvais résultats.
Voici quelques exemples de ces fonctions, qui sont largement inspirées de la thèse de Zarrouk (en tenant aussi compte de résultats expérimentaux) :

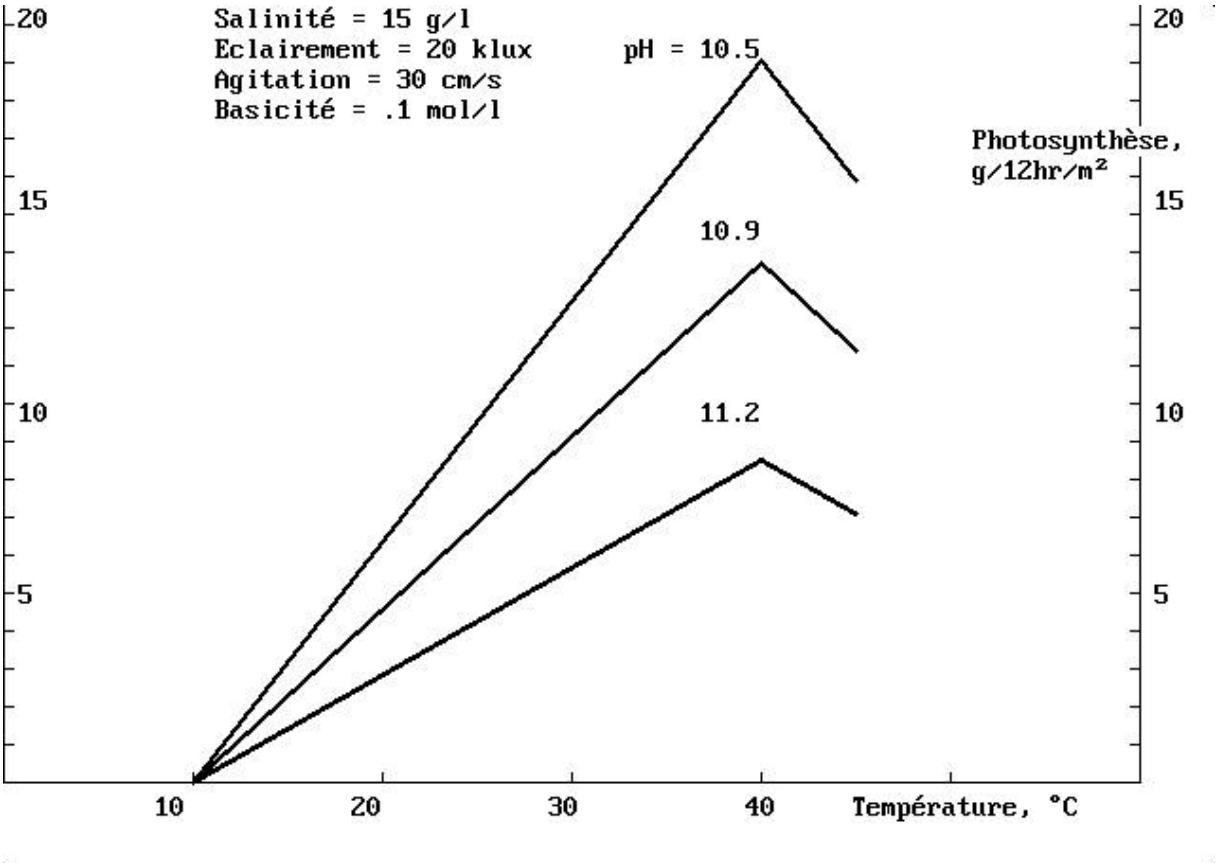
:



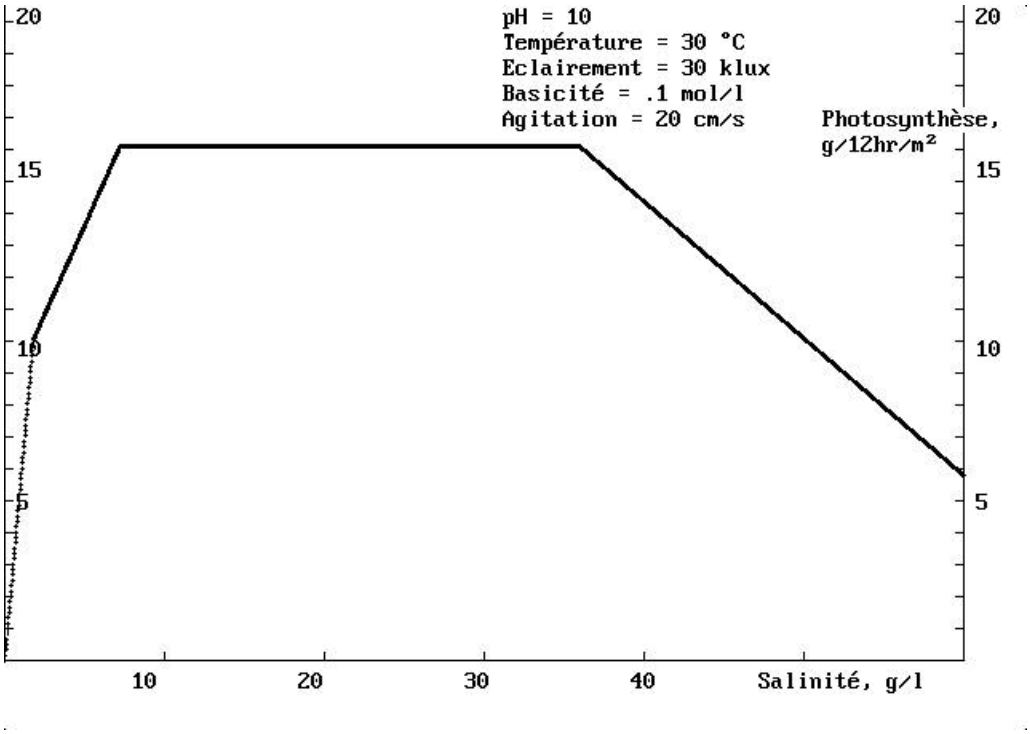
Vitesse photosynthèse de la spiruline en fonction de l'éclairement d'après la thèse de Zarrouk, Fig. 3 [Zarrouk C. "Contribution à l'étude d'une cyanophycée: influence de divers facteurs physiques et chimiques sur la croissance et la photosynthèse de Spirulina maxima (Setch et Gardner) Geitler", Thèse de doctorat, Faculté des Sciences de l'Université de Paris, 06/12/1966]



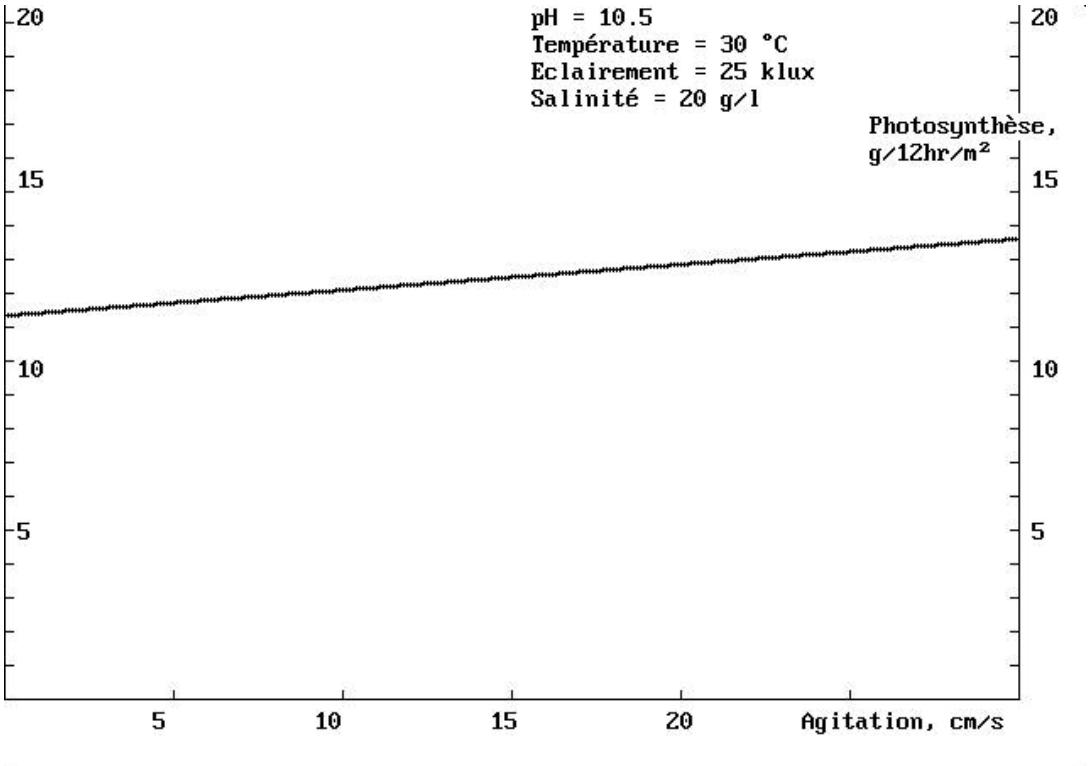
Vitesse de photosynthèse de la spiruline en fonction du pH d'après la thèse de Zarrouk, Fig. 20



Vitesse de photosynthèse de la spiruline en fonction de la température de la culture d'après la thèse de Zarrouk, Fig 19.



Vitesse de photosynthèse de la spiruline en fonction de la salinité du milieu d'après la thèse de Zarrouk, Tableau IV



Vitesse de photosynthèse en fonction de l'agitation (fonction plus ou moins imaginaire, dans laquelle intervient aussi le pH, valable pour systèmes d'agitation habituels jusqu'à la vitesse de 30 cm/s; il est possible qu'avec des systèmes perfectionnés l'on puisse majorer nettement la vitesse de photosynthèse, mais nous n'en avons pas encore l'expérience : au

delà de 30 cm/s la fonction est prévue pour tenir compte de cet effet, mais sans aucune base expérimentale quantifiée)

****